

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Розглянуто непрямий метод визначення втрат електроенергії в тяговій мережі. Наведено приклад розв'язання такої задачі за допомогою спеціалізованої імітаційної моделі та результати статистичного аналізу отриманих результатів. Показане можливе застосування досягнутих результатів.

Рассмотрен косвенный метод определения потерь электроэнергии в тяговой сети. Приведен пример решения такой задачи с помощью специализированной имитационной модели и результаты статистического анализа полученных результатов. Показано возможное применение достигнутых результатов.

An indirect method of electric power losses determination in catenary has been examined. An example of solving such task with the help of specialized imitation model has been given and results of statistic analysis have been presented. Possible ways of using the obtained results have been exemplified.

Применение прямых методов оценки потерь в тяговой сети не дает удовлетворительных результатов в силу ряда причин [1–3]. Ниже рассмотрены вопросы их оценки косвенными методами. В отличие от активного сопротивления трансформаторов, сопротивление в тяговой сети, участвующей в передаче электрической энергии, меняется не только от температуры, но и от числа электроподвижных нагрузок в зоне. Пусть имеется межподстанционная зона (МПЗ) с односторонним питанием и некоторой обобщенной нагрузкой I . Расположение и величина отдельных нагрузок на первом этапе не будет учитываться, тогда справедлива схема 1, приведенная на рис. 1.

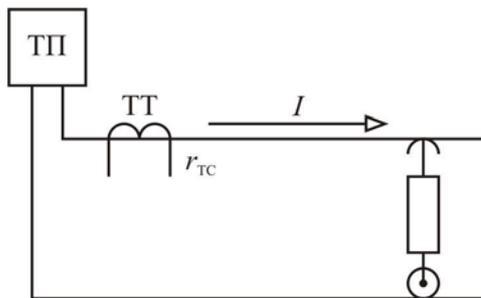


Рис. 1. Расчетная схема к определению эквивалентного сопротивления тяговой сети при одной нагрузке в межподстанционной зоне

Для схемы 1 потери электроэнергии за расчетный период T могут быть вычислены по формуле

$$\Delta W_{TC} = I^2 r_{TC} T, \quad (1)$$

где I – ток нагрузки, который может фиксироваться посредством шунта Ш с подключенным к нему амперметром на дороге с системой тяги постоянного тока или трансформатора тока и

амперметра на дороге с системой тяги переменного тока; r_{TC} – удельное сопротивление тяговой сети, Ом/км; T – расчетный период времени, месяцы.

Однако поездная ситуация может быть самой разнообразной. Пусть, например, она соответствует схеме 2, приведенной на рис. 2.

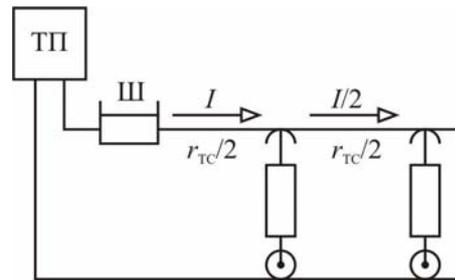


Рис. 2. Расчетная схема к определению эквивалентного сопротивления тяговой сети при двух нагрузках в межподстанционной зоне

Несмотря на то, что суммарный ток нагрузки не изменился, потери электроэнергии за тот же период времени T описывается иным выражением

$$\Delta W_{TC} = \frac{I^2 r_{TC}}{2} + \frac{I^2}{4} \cdot \frac{r_{TC}}{2} = \frac{5}{8} I^2 r_{TC}.$$

Предположим, что мы пытаемся организовать контроль потерь непосредственно по току тяговой подстанции и на основании информации о некоторой обобщенной нагрузке в МПЗ. Тогда схема замещения для схемы 1, схемы 2 и других возможных схем будет одинакова, и будет совпадать, в данном случае, со схемой 1.

Поскольку для действительной и эквивалентной схем должны совпадать рассматриваемые параметры, то справедливы следующие выражения:

- для схемы 1:

$$I^2 r_{TC} = I^2 r_{\text{эКВ1}},$$

$$r_{\text{эКВ1}} = \frac{I^2 r_{TC}}{I^2} = r_{TC},$$

т. е. эквивалентное $r_{\text{эКВ1}}$ и действительное r_{TC} сопротивления совпадают;

- для схемы 2:

$$I^2 r_{TC} = I^2 r_{\text{эКВ2}},$$

$$r_{\text{эКВ2}} = \frac{5}{8} r_{TC}.$$

Рассматривая подстанцию как источник электроэнергии для нагрузок ЭПС, питающий их через некоторое эквивалентное сопротивление, можно сделать вывод, что при прочих равных условиях эквивалентное сопротивление, а значит, и потери электроэнергии меняются в зависимости от того, где расположены нагрузки и от значения их величин. Кроме того, можно заключить, что если бы было известно эквивалентное сопротивление на каждый момент времени, то можно было бы организовать контроль потерь электрической энергии в тяговой сети непосредственно как

$$\Delta W_{TC} = \int_0^T r_{\text{эКВ}} I_t^2 dt. \quad (2)$$

В [3] показано, что величина эквивалентного сопротивления $r_{\text{эКВ}}$ статистически устойчива и колеблется относительно своего устойчивого значения значительно меньше, чем I^2 , и поэтому ее можно вынести за знак интеграла.

Правда эквивалентное сопротивление $r_{\text{эКВ}}$, которое еще иногда называют коэффициентом пропорциональности потерь электроэнергии, статистически устойчиво при незначительных изменениях параметров его определяющих – числа поездов в межподстанционной зоне (МПЗ), соотношения грузопотоков по путям, наличия пунктов параллельного соединения (ППС) и постов секционирования контактной сети (ПСК) и других. Поэтому при практической реализации контроля потерь электроэнергии в тяговой сети этим методом требуется периодическая поправка эквивалентного сопротивления $r_{\text{эКВ}}$.

Величина

$$\int_0^T I_t^2 dt$$

может быть легко измерена при помощи счетчиков квадрата тока. Особенностью такого

счетчика является то, что его обмотка напряжения заменяется токовой и тогда он измеряет не

$$\int_0^T U_t I_t dt,$$

а

$$\int_0^T I_t I_t dt = \int_0^T I_t^2 dt.$$

Таким образом, следует определить эквивалентное сопротивление $r_{\text{эКВ}}$.

Пусть мы имеем информацию о контролируемом участке – параметры тяговой сети, протяженность МПЗ, схему питания тяговой сети, число поездов различного типа, обращающихся на участке, и токи, потребляемые ими. Тогда известными методами можно для заданных условий рассчитать потери электроэнергии ΔP_{TC} аналитическими методами. Если для аналогичных условий оценить потери по эквивалентному сопротивлению $r_{\text{эКВ}}$ и счетчику квадратов тока, то очевидно допустимо равенство с определенной степенью погрешности

$$r_{\text{эКВ}} \int_0^T I_t^2 dt = \Delta P_{TC},$$

откуда для заданных условий

$$r_{\text{эКВ}} = \frac{\Delta P_{TC}}{\int_0^T I_t^2 dt}.$$

В случае если имеется несколько фидеров и двустороннее питание МПЗ, потери энергии выражаются

$$\Delta W_{TC} = r_{\text{эКВ}} \int_0^T \sum_{i=1}^n I_{ii}^2 dt, \quad (3)$$

где i – номер фидера.

Структура формулы (3) очень проста и указывает на возможность использования микропроцессорной техники для реализации аппаратного контроля потерь в тяговой сети. Структурная схема такого контроля приведена на рис. 3.

Решать задачу определения потерь электроэнергии в тяговой сети удобно с помощью метода имитационного моделирования. На кафедре «Электроснабжение железных дорог» ассистентом Р. С. Мыцко и магистрантом Д. А. Босым разработана имитационная модель системы тягового электроснабжения. Ядро программы построено на решении мгновенных схем матричным методом. Общий вид программы представлен на рис 4.

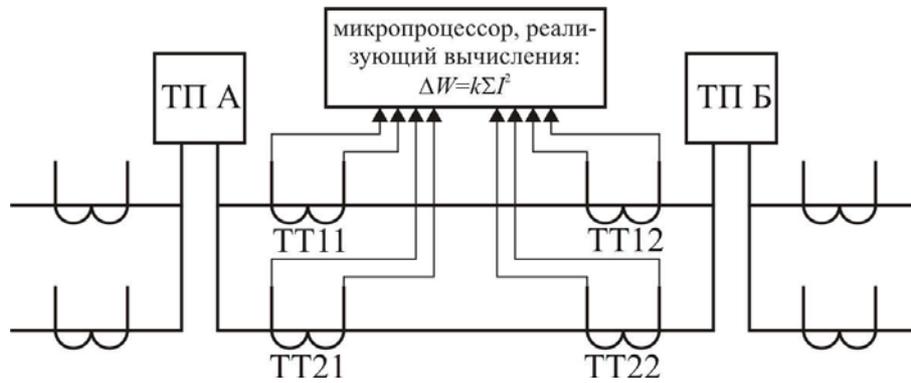


Рис. 3. Структурная схема организации алгоритмического контроля потерь электроэнергии в тяговой сети одной межподстанционной зоны:
 TT11-TT22 – трансформаторы тока на фидерах двух смежных подстанций

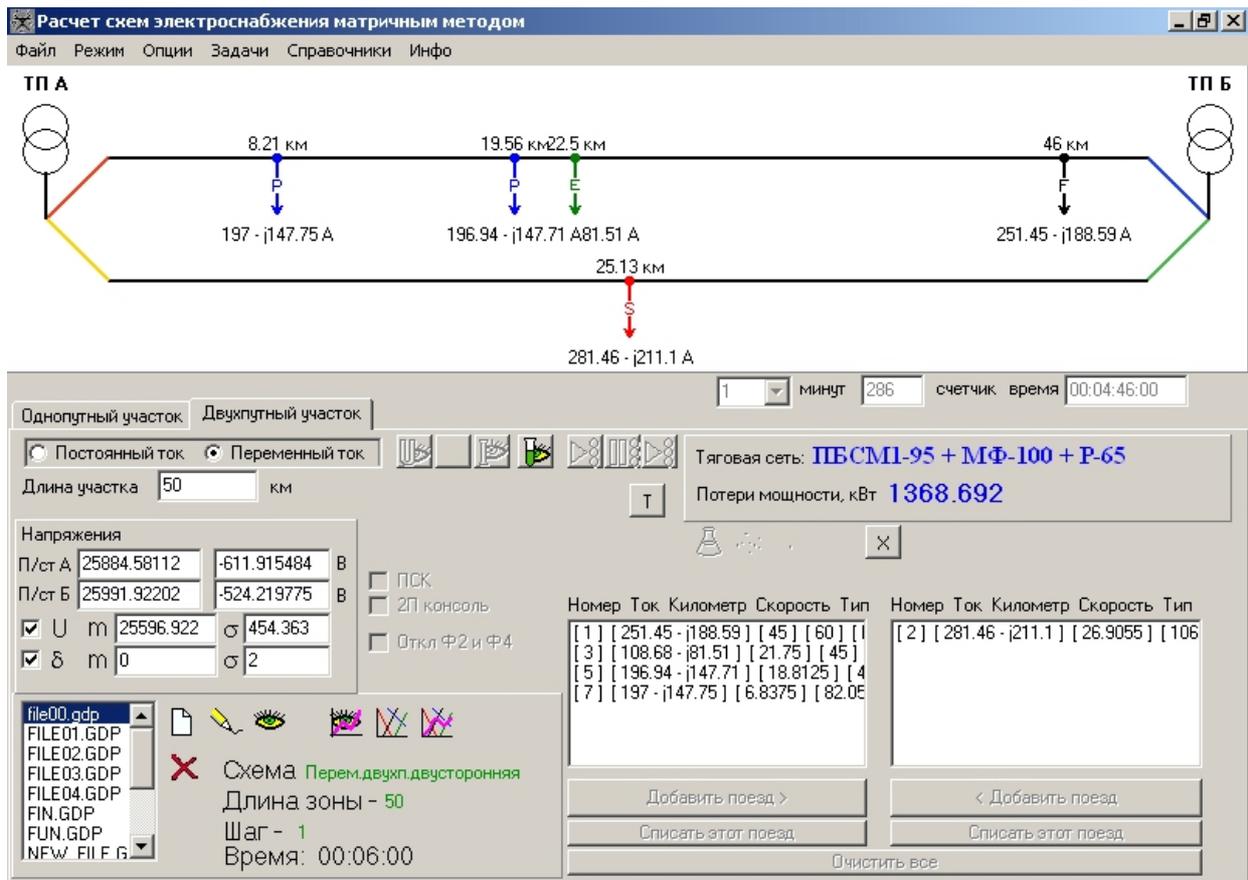


Рис. 4. Общий вид программы Матрикс

Потери активной мощности в каждый момент времени в имитационном комплексе определяются по следующему выражению:

$$\Delta P = \text{Re} \left[J^T \left(M(Z_v)^{-1} M^T \right)^{-1} J \right], \quad (4)$$

где M – первая матрица инцидентий; J – вектор токов электровозов; Z_v – матрица сопротивлений.

Энергия, потребленная поездами за каждый интервал времени, определяется следующим образом:

$$W = \int_0^T \left(\sum_{i=1}^{N_F} I_{Fi} U_{Fi} \right) dt, \quad (5)$$

где I_{Fi} – ток i -го фидера тяговой подстанции; U_{Fi} – напряжение на соответствующем фидере подстанции; N_F – количество фидеров.

Программа имеет возможность создавать графики движения поездов, учитывать изменение тока поезда, колебания напряжения на шинах тяговых подстанций. После создания графика, производится его имитация и анализ полученных показателей.

Потери электроэнергии в тяговой сети меняются в широких пределах. Определим максимальные потери. Максимальные потери в тяговой сети будут при консольных схемах питания электрифицированных участков.

Ниже приведены результаты моделирования системы тягового электроснабжения постоянного тока при следующих исходных данных:

- род тока – постоянный;
- тяговая сеть – М-120+2МФ-100+2А-185+Р-65;
- длина участка – 20 км;
- межпоездной интервал – 8 мин;
- интервал моделирования – 1 месяц.

Принято, что на рассматриваемом участке курсируют 4 условных типа поездов (таблица). Для каждого типа заданы вес и скорость. Имитационный комплекс случайным образом на каждом шаге моделирования выбирает тип поезда, вес поезда и скорость из заданного интервала. Эти характеристики используются для определения токов поездов.

На основании данных о среднем количестве поездов на участке, их типов и величины по-

требляемого тока за период 1 месяц имитационный комплекс формировал вероятностный график движения и вычислял за этот период расход электроэнергии, потери энергии, процент потерь энергии и значение интеграла квадрата тока фидера по времени.

Таблица

Характеристики поездов

Условный тип поезда	Ток поезда, А	Скорость поезда, км/ч	Количество поездов
Грузовой	500...700	60	900
Скоростной	700...900	100...130	60
Электропоезд	400...450	45	540
Пассажирский	450...500	80...90	1 500

Для расчетов статистических оценок потерь электроэнергии в тяговой сети было произведено 200 имитаций работы системы тягового электроснабжения, при этом каждый раз вероятностный график движения формировался заново. График потерь электроэнергии в тяговой сети рассматриваемого участка представлен на рис. 5.

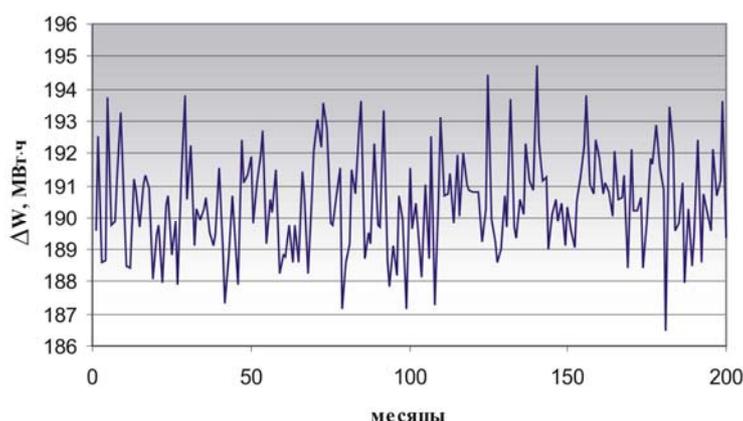


Рис. 5. Потери электроэнергии в тяговой сети рассматриваемого участка по месяцам

Среднемесячное значение потерь электроэнергии составило 190,45 МВт·ч.

Среднее значение годовых потерь электроэнергии составило

$$\Delta W_{\text{год}} = 2,285 \cdot 10^6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Если известна оценка годовых потерь электроэнергии в фидерной зоне $\Delta W_{\text{год}}$, то можно рассчитать величину удельных потерь электроэнергии B_0 как

$$B_0 = \frac{\Delta W_{\text{год}}}{\ell r_{\text{экв}}}, \quad (6)$$

где $\Delta W_{\text{год}}$ – годовые потери электроэнергии в проводах фидерной зоны, кВт·ч; ℓ – длина фидерной зоны, км.

Для рассматриваемого примера величина среднегодовых удельных потерь электроэнергии B_0 составила $2,33 \cdot 10^6$ кВт·ч/Ом·км.

По величине B_0 можно определить оптимальные параметры контактной сети при проектировании новых участков. При этом важно знать не только среднее значение B_0 , но также и закон его распределения. С применением современных вычислительных инструментов (например, программа Crystal Ball) эта задача перестала представлять трудности. Данные о потерях электроэнергии были переданы в Crystal Ball.

На рис. 6 представлен результат подбора распределения для случайной величины – удельных потерь электроэнергии на рассматриваемом участке.

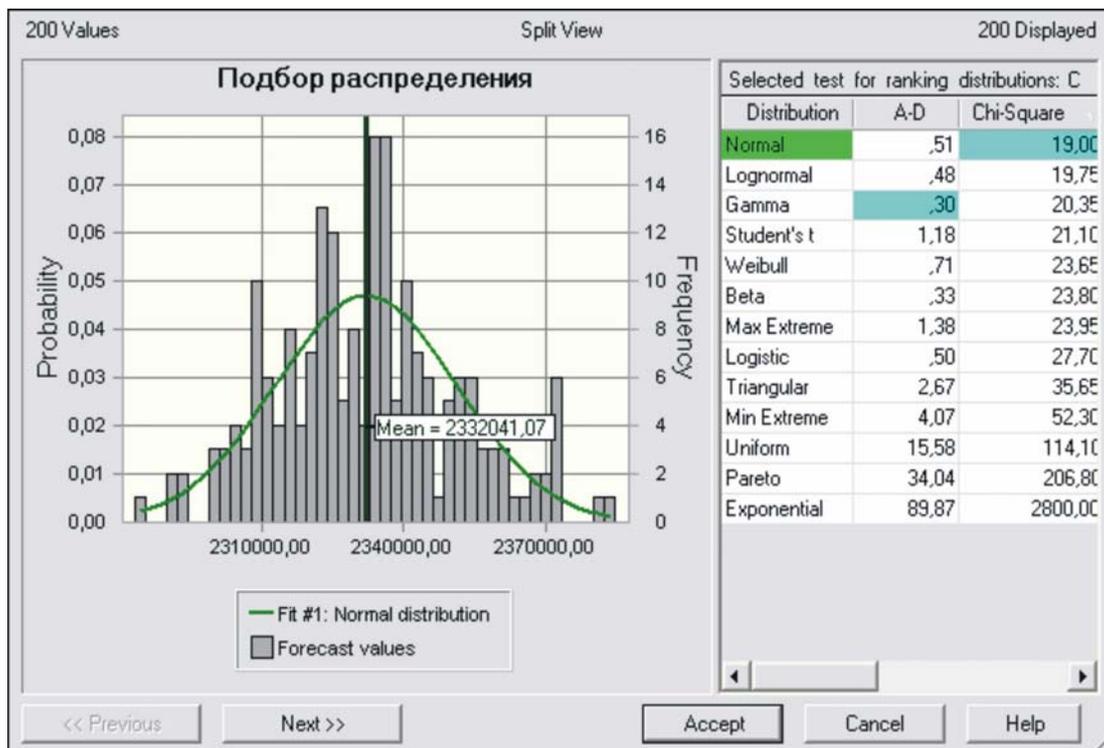


Рис. 6. Подбор закона распределения для удельных потерь электроэнергии на рассматриваемом участке

Выводы

1. В статье рассмотрены вопросы определения потерь электроэнергии в тяговой сети косвенным методом. Показано как можно решить эту задачу с помощью созданной на кафедре «Электроснабжение железных дорог» программы имитационного моделирования Матрикс.

2. Определены максимальные потери для заданного участка постоянного тока.

3. Определены оценки удельных потерь электроэнергии в тяговой сети V_0 . Для рассматриваемого примера величина среднегодовых удельных потерь электроэнергии V_0 составила $2,33 \cdot 10^6$ кВт·ч/Ом·км.

4. По критерию согласия χ^2 можно заключить, что закон распределения среднегодовых удельных потерь электроэнергии V_0 можно считать нормальным.

5. Результаты, полученные в данной статье, планируется использовать для решения задачи определения оптимальной площади сечения контактной сети, а также для аппаратного контроля потерь электроэнергии на электрифицируемом участке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 582 с.
2. Мамошин Р. Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / Р. Р. Мамошин, А. Н. Зимакова. – М.: Транспорт, 1980. – 296 с.
3. Бардушко В. Д. Анализ и параметрический синтез систем тягового электроснабжения. Дисс. ... д-ра техн. наук. – Иркутск: 2001. – С. 133–154.

Поступила в редколлегию 03.04.2006.